

土壤理化性质对优势树种根系生物量的影响

马 骧¹, 谷雨晴², 邹朋峻², 徐丽丽^{3*}

(1. 常州市金坛区森林资源与湿地管理中心, 江苏 常州 213200; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153)

摘要:为了探讨土壤理化性质对优势树种根系生物量的影响,以紫金山南坡马尾松枫香混交林(*Pinus massoniana*×*Liquidambar formosana*, PL)和枫香林(*Liquidambar formosana*, LF)中马尾松、枫香等优势树种为研究对象,采用平均标准木机械布点土柱取样法获取优势树种根系生物量,分析了各优势树种根系(直径 $d \leq 5$ mm)生物量的差异,以及典型林分土壤理化性质对优势树种根系生物量的影响。结果表明:(1)在同一典型林分中,达到林分平均胸径的枫香比相似胸径的马尾松具有显著高的表层土($0 < h \leq 20$ cm)细根($d \leq 2$ mm)生物量。(2)枫香在PL中比在LF中具有显著高的 $0 < h \leq 40$ cm土层细根生物量;而马尾松则有相反趋势,即马尾松在LF中比在PL中具有显著高的表层土以及 $0 < h \leq 40$ cm土层的小根($2 \text{ mm} \leq d \leq 5 \text{ mm}$)和根系生物量。(3)土壤pH值、土壤含水率、土壤全磷、全钾是影响马尾松、枫香根系生物量的关键因子;典型林分中枫香根系生物量与速效磷显著正相关,马尾松根系生物量则与速效钾显著正相关。(4)马尾松、枫香根系生物量均随土壤深度增加而显著降低。

关键词:细根生物量;土壤养分;速效养分;有机质;典型林分

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2023.02.003

Effect of soil physio-chemical properties on root biomass of dominant trees

Ma Xiang¹, Gu Yuqing², Zou Pengjun², Xu Lili^{3*}

(1. Forest Resources and Wetland Management Center of Jintan District, Changzhou, Changzhou 213200, China;
2. College of Biology and the Environment, Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China,
Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China; 3. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

Abstract: The effect of soil physio-chemical properties on the root biomass of dominant trees was evaluated. The root biomass (root diameter (d) less than or equal to 5 mm) of dominant trees (i. e., *Pinus massoniana* and *Liquidambar formosana*) were determined using the Specific Sampling Method of averaged standard tree and analyzed under two typical forests, including *P. massoniana*×*L. formosana* forest (PL) and *L. formosana* forest (LF) in Nanjing Zijin Mountain. Effects of soil physio-chemical properties in typical forest on the root biomass of dominant trees were also analyzed. The results showed that: 1) The fine root biomass ($d \leq 2$ mm) of *L. formosana* was higher than that of *P. massoniana* with similar DBH in surface soil ($0 < h \leq 20$ cm) under each typical forest. 2) The fine root biomass of *L. formosana* at soil depth of $0 < h \leq 40$ cm was higher in PL forest than that in LF forest. However, the biomass of small root ($2 \text{ mm} \leq d \leq 5 \text{ mm}$) and all root (fine and small roots) of *P. massoniana* at soil depths of $0 < h \leq 20$ cm and $0 < h \leq 40$ cm was lower in PL forest than that in LF forest. 3) The pH, moisture content, total phosphorus and potassium were the key factors influencing root biomass of *P. massoniana* and *L. formosana* in Nanjing Zijin Mountain. Moreover, the root biomass of *L. formosana* was signifi-

收稿日期:2023-02-04;修回日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目“间伐影响人工林细根动态的根际环境调控机制”(31971453);江苏省林业科技创新与推广项目“古树名木健康诊断及保护复壮技术与集成”(LYKJ[2021]27)

作者简介:马 骧(1983-),男,江苏常州人,高级工程师。主要从事森林经营与管理。E-mail:20771251@qq.com

***通信作者:**徐丽丽(1991-),女,浙江台州人,硕士。主要研究方向:森林保护学。E-mail:jiangfeimeng@126.com;Tel:13913905746

cantly and positively correlated with available phosphorus. The root biomass of *P. massoniana* was significantly and positively correlated with available potassium. 4) The root biomass of *P. massoniana* and *L. formosana* decreased with the increase of soil depth.

Key words: Fine root biomass; Soil nutrition; Available nutrition; Organic matter; Typical forest

根系是林木重要的营养器官,不仅能对林木起到固定支撑作用,而且还能从土壤中获得水分、养分来满足林木生长发育需要^[1]。根系及其细根周转直接参与森林土壤生态系统的物质循环(如碳循环等)和能量流动^[2]。较小的根系(直径 $d \leq 5$ mm)由于较大的比表面积和较快的周转速率,因而是土壤中物质循环和能量流动的重要参与者^[3]。研究表明根系生物量对土壤碳库大小及稳定性具有重要作用^[4]。优势乔木树种根系生物量可占森林总根系生物量的86.54%^[5]。因此,了解典型林分优势树种根系生物量特征及其影响因素对森林生态系统生产力和土壤碳库大小的评估具有重要的意义。

根系生物量受树种和土壤理化性质显著影响,尤其是细根^[6-8]。在中国温带典型森林,阔叶树比针叶树具有更高的细根生物量^[9]。天然林细根生物量及产量分别比人工林平均高出36.5%和36%左右^[10]。除树种差异外,林木根系生物量的空间异质性还与土壤水分、养分的异质性有关。折红燕等^[11]研究发现,大青沟水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)、大果榆(*Ulmus macrocarpa* Hance)等苗木根系生物量垂直分布都与土壤有机碳、全氮、全磷、速效氮、速效磷和速效钾含量显著相关。杨秀云等^[12]研究表明,未采伐干扰的华北落叶松[*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.]细根生物量受土壤水分、全氮和硝态氮的影响较大。邹显花等^[13]研究发现,在供磷异质条件下,在缺磷或低磷区域的杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]根系通过增生来寻觅土壤中磷。Brassard等^[14]研究表明,森林群落演替后期,土壤有机质和养分含量较高,不同树种间竞争激烈,林木细根能迅速识别富养土壤斑块并大量增生。然而,目前关于北亚热带次生林中先锋树种与乡土树种的根系生物量差异,以及根系生物量对土壤理化性质响应的研究依旧较为缺乏。

紫金山森林曾因战争而毁坏,在经过封山育林和补植先锋树种后,长期演替形成了先锋树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)与乡土树种如栓皮栎(*Quercus variabilis*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等

不同程度混交的森林群落类型,这在北亚热带过渡带地区具有一定的代表性。然而,以往对紫金山典型林分优势树种根系生物量特征的研究较少^[15]。因此,本试验以紫金山南坡马尾松枫香混交林(*P. massoniana*×*L. formosana*, PL)和枫香林(*L. formosana*, LF)等2种近成熟林中马尾松、枫香等优势树种为研究对象,比较分析同一典型林分中马尾松与枫香在 $0 < h \leq 20$ cm和 $20 < h \leq 40$ cm土层中的根系生物量差异,以及它们的根系生物量与典型林分土壤理化性质的相互关系,旨在探讨树种和土壤理化性质对林木根系生物量的影响。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于南京市紫金山($118^{\circ}48'24''\text{E}$ — $118^{\circ}53'4''\text{E}$, $32^{\circ}1'57''\text{N}$ — $32^{\circ}16'15''\text{N}$),属于北亚热带季风气候,四季分明,年降水量1 000—1 050 mm,年均气温 15.4°C ,年均日照2 213 h,全年无霜期322 d。土壤为酸性黄棕壤。森林资源清查数据表明,紫金山针叶林 516.71 hm^2 ,阔叶林 $1\,752.50\text{ hm}^2$,针阔混交林 14.01 hm^2 ,其他林分 118.04 hm^2 。紫金山森林针叶树种主要为马尾松,阔叶树种主要为栓皮栎、枫香、朴树(*Celtis sinensis*)、糙叶树(*Aphananthe aspera*)等^[15]。

1.2 样地设置与试验设计

于2021年10月在紫金山南坡 1 hm^2 马尾松枫香混交林和 1.36 hm^2 枫香林的固定样地中,分别随机设置3个立地条件相似且互不相邻的 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 典型林分样方。在每个典型林分样方内,除去地面凋落物和草本植物,按“S”型选7个采样点,用土钻取土层深度(h)为 $0 < h \leq 20$ cm和 $20 < h \leq 40$ cm的土样,并将每层取样点土样混合后作为该层土壤的待测土样。同时,挖取剖面采用环刀法测定各土层土壤密度。土样经冷藏箱带回实验室后,过2 mm钢筛,并混合均匀,以四分法保留部分样品;然后取适量土壤样品用于土壤含水率、pH值、铵态氮、硝态氮、有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾等指标的测定。典型林分具体情况详见表1。

表 1 马尾松枫香混交林与枫香林样地基本情况

类别	土壤深度/cm	马尾松枫香混交林	枫香林
经纬度	—	118°52′18.5″ E/ 32°03′43.1″ N	118°51′56.0″ E/ 32°03′32.1″ N
海拔/ m	—	165 a	59 b
坡度	—	21°	5°
坡向	—	南向	南向
优势树种	—	马尾松、枫香	枫香、马尾松
林龄/a	—	70 a	50 b
林分密度/(株/hm ²)	—	1 267	1 616
平均胸径/cm	—	22.0	21.3
平均树高 /m	—	12.1	12.5
容重 /(g/cm ³)	0—20	0.72±0.07 b	1.58±0.07 a
	20—40	0.84±0.03 b	1.64±0.03 a
含水率/%	0—20	19.19±1.56	16.26±1.11
	20—40	16.10±0.85	13.84±0.43
pH 值	0—20	4.72±0.08 b	5.26±0.20 a
	20—40	4.64±0.08 b	5.30±0.20 a
有机质含量 /(g/kg)	0—20	85.4±23.85 a	35.34±7.63 b
	20—40	35.00±6.59 a	9.65±2.59 b
全氮含量/(g/kg)	0—20	3.47±0.87 a	1.73±0.29 b
	20—40	1.67±0.30 a	0.73±0.17 b
全磷含量/(g/kg)	0—20	0.30±0.07 a	0.18±0.04 b
	20—40	0.20±0.03 a	0.07±0.03 b
全钾含量/(g/kg)	0—20	3.22±0.15	3.63±0.17
	20—40	3.17±0.19	3.54±0.22
速效磷含量/(mg/kg)	0—20	6.93±0.96	9.29±3.39
	20—40	3.56±0.57	1.05±0.12
速效钾含量/(mg/kg)	0—20	11.93±0.38 a	11.09±0.16 b
	20—40	11.27±0.42 a	10.05±0.25 b
铵态氮含量 /(mg/kg)	0—20	3.28±0.60	6.93±0.84
	20—40	0.81±0.16 b	5.35±0.17 a
硝态氮含量/ (mg/kg)	0—20	16.25±3.78 a	4.64±0.66 b
	20—40	8.40±1.16 a	1.68±0.30 b

注:数值为平均值±标准误;不同字母表示在林分之间的差异显著($P<0.05$)。

1.3 根系采样调查方法

本研究中根系生物量是指直径 $d \leq 5$ mm 根的生物量干质量。其中,直径 $d \leq 2$ mm 的根归为细根, $2\text{ mm} < d \leq 5\text{ mm}$ 的根归为小根^[16]。由于全根挖掘法对林木破坏较大,且野外实施较为困难,因此本研究采用平均标准木机械布点土柱取样法获取单位面积内林木根系生物量。具体方法如下:根据 1 hm² 马尾松、枫香混交林和 1.36 hm² 枫香林的固定样地中每木检尺数据,计算出典型林分各乔木树种的重要值以及林木平均胸径,选择典型林分中与平均胸径相近的优势树种的林木为标准木,其中马尾松标准木和枫香标准木各 9 株。在以每株标准木树干为中心,距离约 50 cm 处(树冠内),选择互为 120° 的 3 个土柱取样点,铲除地表凋落物后,分别挖取面积为 20 cm×20

cm,土壤深度为 $0 < h \leq 20\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm} < h \leq 40\text{ cm}$ 含有根系样品的土块。将含有根系的土块放入 120 目(孔径约为 0.125 mm)网袋中,带回实验室并置于自来水中反复清洗。根据根的外形、颜色、根皮活性、韧性、气味等分拣出目标树根和其他植物根系。然后,林木根系中小根和细根分拣开,置于烘箱中,以 65 ℃ 烘干 72 h 后,测定各根系的干质量(精确到 0.01 g)。用根系生物量(干质量)除以所取土块的面积(400 cm²)得到单位面积根系生物量。

1.4 土壤理化性质指标的测定

pH 用电位法测定,含水率采用烘干法测定,容重采用环刀法测定,粒径采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)测定。有机质质量分数采用重铬酸钾氧化法测定。全磷采用钼锑抗比色法测定,有效磷采用浸提法测定;全钾采用火焰光度计法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;铵态氮和硝态氮采用紫外分光光度计法测定。

1.5 数据处理方法

用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 进行数据分析,用 Origin 8.5 进行作图。用 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验检查数据的正态性和方差齐性之后,使用单因素方差分析描述在不同林分之间土壤理化性质指标的差异,用双因素描述树种和土层以及它们之间的相互作用对细根生物量的影响;用冗余分析描述细根生物量与土壤养分之间的相互关系。

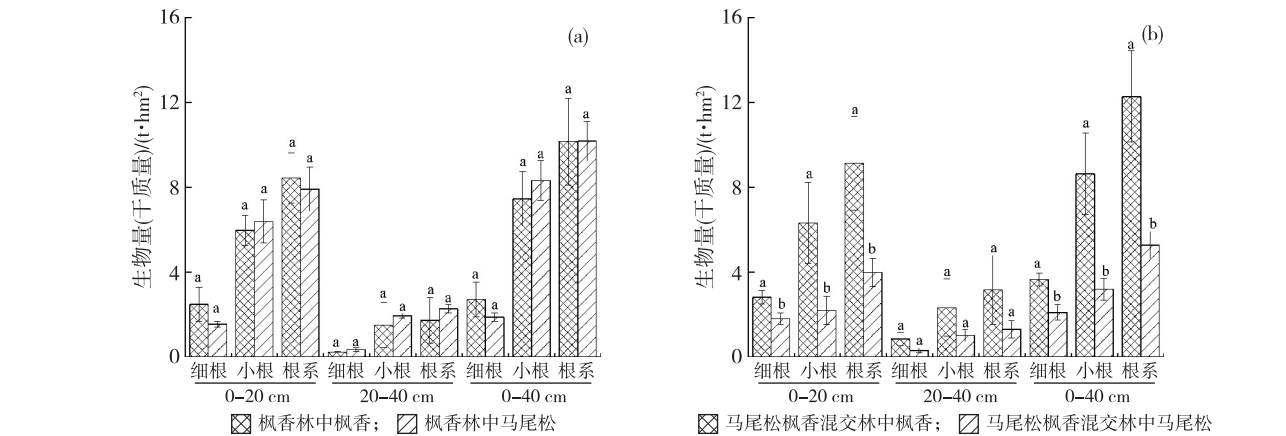
2 结果与分析

2.1 同一林分中不同优势树种根系生物量

双因素方差分析表明(见表 2),树种和土壤深度及其相互作用对优势树种的细根生物量有显著或极显著影响($P<0.05$ 或 0.01),并且土壤深度对小根及根系生物量(小根+细根)也有极显著影响。同一林分中不同优势树种(枫香、马尾松)的细根、小根以及根系生物量均存在一定差异。具体表现为,在枫香林中,枫香与马尾松的细根、小根以及根系生物量(干质量)在 0—20 cm、20—40 cm 和 0—40 cm 等 3 个土层中均无显著差异(如图 1a);在马尾松枫香混交林中,枫香的细根、小根以及根系生物量在 0—20 cm 和 0—40 cm 等 2 个土层中均分别显著高于马尾松的细根、小根以及根系生物量($P<0.05$),但在 20—40 cm 土层中与马尾松的细根、小根以及根系生物量(干质量)均无显著差异(如图 1b)。此外,在同一林分的不同土层之间,0—20 cm 土层中的优势树种(枫香、马

尾松) 细根、小根以及根系的生物量干质量均高于 20—40 cm 土层中对应的优势树种的细根、小根以及

根系生物量干质量。在同一优势树种不同根径之间, 其细根生物量干质量均低于小根生物量干质量。



注:同一指标下,不同小写字母表示同一林分中不同树种之间差异显著($P<0.05$),相同小写字母表示同一林分中不同树种之间差异不显著($P>0.05$)

图 1 2 种林分优势树种根系生物量

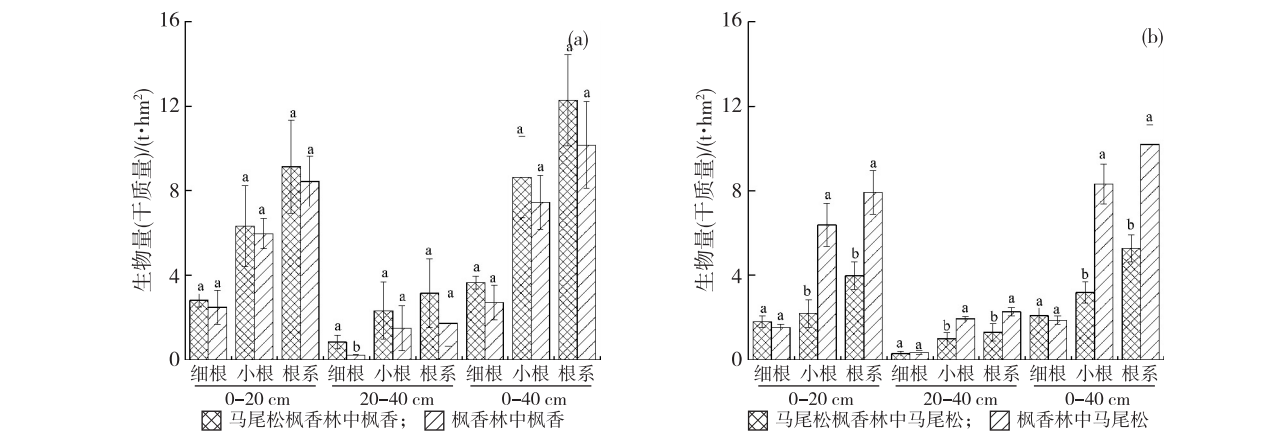
类别	小根生物量		细根生物量		小根+细根生物量	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
树种	1.956	0.177	15.935	<0.001 *	4.189	0.054
土壤深度	18.423	<0.001 *	122.958	<0.001 *	36.828	<0.001 *
树种×土壤深度	0.751	0.396	6.944	0.016 *	1.684	0.209

注: * 表示统计学上显著差异。

2.2 不同林分中同一优势树种根系生物量

紫金山南坡枫香、马尾松等优势树种的细根、小根以及根系生物量在不同林分之间存在一定的差异(如

图 2)。对于枫香而言,0—20 cm、20—40 cm 以及 0—40 cm 等土层中的小根与根系生物量干质量在马尾松枫香混交林与枫香林之间的差异均不显著,但 20—40 cm 土层中的细根生物量在马尾松枫香混交林要显著高于枫香林(如图 2a, $P<0.05$)。对于马尾松而言,0—20 cm、20—40 cm 以及 0—40 cm 等 3 个土层中的细根生物量干质量在马尾松枫香混交林与枫香林之间均差异不显著,但 0—20 cm、20—40 cm 以及 0—40 cm 等 3 个土层中小根与根系的生物量干质量均为枫香林显著高于马尾松枫香混交林(如图 2b, $P<0.05$)。



注:同一指标下,不同小写字母表示相同树种在不同林分之间差异显著($P<0.05$),相同小写字母则表示相同树种在不同林分之间差异不显著($P>0.05$)

图 2 枫香(a)和马尾松(b)的根系生物量

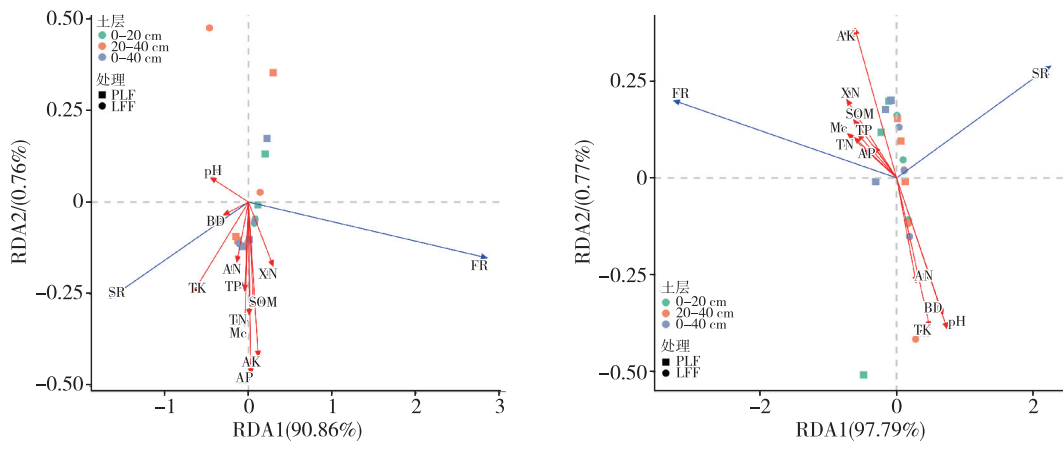
2.3 土壤基本理化性质对根系生物量的影响

将不同典型林分土壤基本理化性质(如土壤 pH 值、土壤密度、土壤含水率、土壤有机质、土壤养

分等)视为因子变量,把枫香、马尾松的细根(FR)和小根(SR)生物量干质量作为因变量,并对其进行冗余分析(RDA)。在 RDA 限制性排序分析中,第一

轴和第二轴的特征值较大累计解释的信息量较多,故采用第一、第二排序轴作二维排序图(见图3)。对于枫香,土壤 pH 值、土壤含水率、土壤全磷、全钾和速效磷对其细根和小根生物量干质量的解释率分别为 23.5% ($P<0.01$), 6.0% ($P<0.05$), 0.2% ($P<0.01$), 15.1% ($P<0.05$) 和 1.2% ($P<0.05$); 对于马尾松,典型林分土壤 pH 值、土壤含水率、土壤全磷、全钾和速效钾对其细根和小根生物量干质量的解释率分别为 31.7% ($P<0.01$), 4.8% ($P<0.01$), 31.1% ($P<0.05$), 6.3% ($P<0.01$) 和 1.7%

($P<0.01$)。此外,在冗余分析二维排序图中,因子变量和因变量之间夹角的余弦值可以表示二者之间的相关性。因此,对于枫香,典型林分土壤含水率、全磷和速效磷对其根系(细根、小根)生物量具有显著正影响,pH 值和全钾对细根生物量是显著负影响,而对小根生物量是显著正影响;对于马尾松,根系(细根、小根)生物量与典型林分土壤 pH、全钾显著负相关,与速效钾含量显著正相关;并且,细根生物量还与土壤含水率、全磷含量显著正相关,小根生物量则与土壤含水率、全磷含量显著负相关。



注:AK—速效钾,AN—铵态氮,AP—速效磷,BD—土壤密度,FR—细根,LFF—枫香林中枫香,LFM—枫香林中马尾松,MC—土壤含水率,pH—氢离子浓度指数,PLF—马尾松-枫香混交林中枫香,PLM—马尾松-枫香混交林中马尾松,SOM—土壤有机质,SR—小根,TK—全钾,TN—全氮,TP—全磷,XN—硝态氮。

图 3 土壤基本理化性质与根系生物量之间的冗余分析

3 讨论

3.1 不同树种根系生物量的差异

不同树种间根系生物量的差异是树种生物学特性和环境共同作用的结果。在本研究中,达到林分平均胸径的枫香比同一林分中类似胸径的马尾松,具有显著更高的表层土细根生物量,这与 Wang 等(2019)^[9]和 Cai 等(2019)^[10]研究结果相似,符合被子植物与裸子植物之间的形态学差异^[10]。这也可能是因为在林冠郁闭后,随着森林群落的演替进行,阔叶树的细根生物量在逐渐增加,而针叶树的细根生物量在逐渐减少。紫金山南坡成熟林中马尾松表层土细根生物量约为(1.53±0.12)~(1.79±0.22) t/hm²,与广西亚热带季风气候区的马尾松过熟林(林龄≥51 a)表层土细根生物量相类似^[18]。此外,马尾松、枫香根系生物量随土壤深度增加而显著降低(见图1,表2),这与马姜明等^[16]和宋尊荣等^[18]研究结果相一致,符合北热带林木根系垂直分

布特征。

3.2 土壤理化性质对根系生物量的影响

林木根系生物量与土壤理化性质存在一定的耦合关系^[20],因而土壤空间的异质性是同一树种根系分布空间异质性的主要原因。紫金山南坡土壤磷钾含量及其可利用性均处于较低水平,而冗余分析表明典型林分土壤磷、钾是影响马尾松、枫香根系生物量的关键因子,因此土壤磷、钾含量及可利用性极可能是紫金山林木根系生长的主要限制性因素,基本符合中国亚热带至暖温带植物普遍受磷限制的观点^[21]。典型林分优势树种细根生物量与土壤 pH 值极显著负相关,与土壤含水率显著或极显著正相关,这与张小朋等^[22]和杨秀云等^[12]研究结果基本一致。这可能是因为 pH 值决定了土壤中许多元素的形态和溶解性,如土壤养分状态和有效性,进而影响了林木细根的生长^[23];而土壤水分含量则通过影响林木的蒸腾作用以及土壤养分的释放、迁移、吸收等,进而直接影响林木细根生物量^[22, 24],例如,在夏季降水量小

时,因强烈的蒸发及植物蒸腾作用使土壤水分含量显著降低,导致了植物细根生物量的下降^[3]。此外,不同树种根系生物量对土壤理化性质的响应存在一定差异^[11]。研究中枫香根系生物量还与速效磷显著正相关,而马尾松根系生物量则与速效钾显著正相关,这可能是因为在亚热带常绿和落叶共存的森林生态系统中,落叶树种相较于常绿树种,其细根具有更低的 C:P 和 N:P^[24],需要投入更多富磷的 rRNA 来支持蛋白质的合成^[25],因而枫香细根生物量与土壤 P 的有效性关联更加密切。

4 结论

综上所述,在相似立地条件下,相比于先锋树种马尾松,相似胸径的枫香具有显著较高的表层土细根生物量。土壤 pH 值、土壤含水率、土壤全磷、全钾是影响马尾松、枫香根系生物量的关键因子;此外,典型林分中枫香根系生物量还与速效磷显著正相关($P<0.05$),马尾松根系生物量则与速效钾极显著正相关($P<0.01$)。马尾松、枫香根系生物量随土壤深度增加而显著降低。紫金山土壤磷、钾含量较低,可利用性较差,可能是林木根系生物量的主要限制性因子。

参考文献:

- [1] 李林鑫,郑姗姗,许建伟,等.林木根系生物量分配影响机制研究进展[J].世界林业研究,2022,35(2):15-20.
- [2] DANNOWSKI M, BLOCK A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities[J]. Plant and Soil, 2005, 272(1-2): 61-76.
- [3] 杨玉盛,陈光水,林 鹏,等.格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力[J].生态学报,2003,23(9):1719-1730.
- [4] KUZYAKOV Y, DOMANSKI G. Carbon input by plants into the soil. Review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163(4): 421-431.
- [5] HATTON P J, CASTANHA C, TORN M S, et al. Litter type control on soil C and N stabilization dynamics in a temperate forest[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1358-1367.
- [6] VOGT K A, VOGT D J, BLOMFIELD J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level[J]. Plant and Soil, 1998, 200(1): 71-89.
- [7] WANG H, LIU S, WANG J, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 4-13.
- [8] YU H, FAN J, HARRIS W, et al. Relationships between below-ground biomass and foliar N:P stoichiometry along climatic and altitudinal gradients of the Chinese grassland transect[J]. Plant Ecology, 2017, 218: 661-671.
- [9] WANG N, WANG C, QUAN X. Variations in fine root dynamics and turnover rates in five forest types in northeastern China[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 31(3): 871-884.
- [10] CAI H, LI F, JIN G. Fine root biomass, production and turnover rates in plantations versus natural forests: effects of stand characteristics and soil properties[J]. Plant and Soil, 2019, 436: 463-474.
- [11] 折红燕,罗于洋,张海龙,等.大青沟水曲柳、蒙古栎、大果榆苗木根系生物量与土壤养分及 pH 值关系的研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(12):183-189.
- [12] 杨秀云,韩有志,武小钢.华北落叶松林细根生物量对土壤水分、氮营养空间异质性改变的响应[J].植物生态学报,2012,36(9): 965-972.
- [13] 邹显花,吴鹏飞,贾亚运,等.杉木根系对不同磷斑块浓度与异质分布的阶段性响应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4): 1056-1063.
- [14] BRASSARD B W, CHEN H Y H, BERGERON Y. Influence of environmental variability on root dynamics in northern forests[J]. Critical Reviews in Plant Science, 2009, 28(3): 179-197.
- [15] 袁在翔.南京紫金山 2 种典型林分土壤碳库与养分特征[D].南京:南京林业大学,2017.
- [16] 马姜明,刘世荣,刘兴良.川西亚高山暗针叶林恢复过程中根系生物量研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2010,28(3): 56-60.
- [17] PREGITZER K S, DEFOREST J L, BURTON A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees[J]. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 293-309.
- [18] 宋尊荣,秦佳双,李明金,等.南亚热带马尾松人工林根系生物量分布格局[J].广西师范大学学报(自然科学版),2020,38(1): 149-156.
- [19] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [20] 吕 渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11): 3979-3987.
- [21] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [22] 张小朋,殷 有,于立忠,等.土壤水分与养分对树木细根生物量及生产力的影响[J].浙江林学院学报,2010,27(4): 606-613.
- [23] NOWTONY I, DAHNE J, KLINGELHOFER D, et al. Effect of artificial soil acidification and liming on growth and nutrient status of mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) [J]. Plant and Soil, 1998, 199: 29-40.
- [24] 周永姣,王满堂,王钊颖,等.亚热带 59 个常绿与落叶树种不同根序细根养分及化学计量特征[J].生态学报,2020,40(14): 4975-4984.
- [25] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, et al. Organism size, life history, and N:P stoichiometry: toward a unified view of cellular and ecosystem processes[J]. BioScience, 1996, 46(9): 674-684.